昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*，June 2007，50(6)：567 – 573 ISSN 0454-6296

玫烟色拟青霉对小菜蛾致病力的时间-剂量-死亡率模型模拟

吕利华[1]，**何余容**[2,*]，**武亚敬**[2]，**冯 夏**[1]，**陈焕瑜**[1]

（1. 广东省农业科学院植物保护研究所，广州 510640；2. 华南农业大学昆虫学系，广州 510642）

摘要：小菜蛾 *Plutella xylostella* 是我国南方十字花科蔬菜上的重要害虫，已对田间常用的化学杀虫剂产生了严重的抗性。为寻找有效的小菜蛾生物防治措施，本实验研究了一株分离自家白蚁的玫烟色拟青霉 *Paecilomyces fumosoroseus*（SCAU-PFCF01）对小菜蛾 2～4 龄幼虫的致病力。实验采用浸液法，供试浓度为 1×10^3、1×10^4、1×10^5、1×10^6 和 1×10^7 个孢子/mL。结果表明：随玫烟色拟青霉孢子浓度的升高，小菜蛾的感病死亡率增加，在浓度为 1×10^7/mL 时，小菜蛾 2、3 和 4 龄幼虫的累计死亡率分别为 96%、85% 和 80%。玫烟色拟青霉对小菜蛾各龄幼虫的致病力与供试龄期有关，其感病的敏感顺序为 2 龄、3 龄和 4 龄。用时间-剂量-死亡率模型（time-dose-mortality model，TDM）对各龄幼虫的致病力数据进行模拟，所建模型均顺利通过 Hosmer-Lemeshow 拟合异质性检验，表明模型拟合良好，并由模型估计出了该菌株对小菜蛾各龄幼虫的致死剂量与致死时间。2 龄幼虫接种后第 7 天、3 龄幼虫接种后第 5 天、4 龄幼虫接种后第 4 天的 LC_{50} 估计值分别为 1.17×10^4、1.44×10^4 和 5.21×10^4/mL，LC_{90} 估计值分别为 1.98×10^6、3.82×10^7 和 1.29×10^8/mL。玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫的致死时间与浓度相关，供试各龄幼虫的 LT_{50} 值随着孢子悬浮液浓度的增加而递减，在 1×10^5～1×10^7/mL 的范围内，2 龄幼虫的 LT_{50} 值从 3.16 天降低到 1.72 天，3 龄幼虫的 LT_{50} 从 3.21 天降低到 1.83 天，4 龄幼虫的 LT_{50} 从 3.69 天降低到 2.04 天。即 2 龄幼虫致死所需的时间最短，其次为 3 龄幼虫，4 龄幼虫致死所需的时间最长。结果显示了该株玫烟色拟青霉在小菜蛾的生物防治中具较强的应用潜力。

关键词：玫烟色拟青霉；小菜蛾；致病力；时间-剂量-死亡率模型；生物防治

中图分类号：Q965.9 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296(2007)06-0567-07

The time-dose-mortality model of a *Paecilomyces fumosoroseus* isolate on the diamondback moth，*Plutella xylostella*

LU Li-Hua[1]，HE Yu-Rong[2,*]，WU Ya-Jing[2]，FENG Xia[1]，CHEN Huan-Yu[1] (1. Institute of Plant Protection，Guangdong Academy of Agriculture Sciences，Guangzhou 510640，China；2. Department of Entomology，South China Agricultural University，Guangzhou 510642，China)

Abstract：The diamondback moth，*Plutella xylostella*，is an important insect pest of cruciferous vegetables in south China and has developed serious resistance to insecticides used. In an effort to search for alternative control methods，the pathogenicity of an isolate (SCAU-PFCF01) of the fungus *Paecilomyces fumosoroseus*，originally derived from *Coptotermes formosanus*，against the diamondback moth larvae，was studied in the laboratory by immersing larvae of different instars into serial concentrations of 10^3 – 10^7 conidia/mL of the fungus. The mortality of the diamondback moth caused by infection of *P. fumosoroseus* increased with the concentration of conidial suspension and the time after treatment. The highest concentration (10^7 conidias/mL) treatment caused 96%，85%，and 80% mortality for 2nd，3rd，and 4th instar larvae on day 7，respectively. A time-dose-mortality model was used to analyze the bioassay data and the model fitted the data well，resulting in parameters for estimating the time and dose effects. The pathogenicity of *P. fumosoroseus* to the diamondback moth differed among various larval stages. The susceptibility of the diamondback moth larvae to

---

基金项目：广东省自然科学基金项目(032021)；广东省科技计划项目(200320501，2006B20301037)

作者简介：吕利华，男，1964 年生，河北人，博士，研究员，主要从事入侵生物和害虫生物防治研究，E-mail：lhlu@gdppri.com

* **通讯作者** Author for correspondence，E-mail：yrhe@scau.edu.cn

收稿日期 Received：2006-11-02；**接受日期** Accepted：2006-12-05

P. fumosoroseus decreased in the sequence of 2nd instar, 3rd instar, and 4th instar. The estimated LC_{50} values of 2nd instar on day 7 after treatment, 3rd instar on day 5 after treatment and 4th instar on day 4 after treatment were 1.17×10^4, 1.44×10^4, and 5.21×10^4 conidia/mL, respectively; while LC_{90} of 2nd, 3rd, 4th instar larvae were 1.98×10^6, 3.82×10^7, and 1.29×10^8 conidia/mL, respectively. The median lethal time of *P. fumosoroseus* to the diamondback moth larvae differed at various concentrations. Values of LT_{50} of all tested instars were shortened with concentration. The LT_{50} values of 2nd, 3rd, and 4th instar were 3.16 - 1.72 days, 3.21 - 1.83 days and 3.69 - 2.04 days, respectively, in the range of $1 \times 10^5 - 1 \times 10^7$ conidia/mL. The results suggested the potential of the isolate SCAU-PFCF01 for use in microbial control of *P. xylostella*.

Key words: *Paecilomyces fumosoroseus*; *Plutella xylostella*; pathogenicity; time-dose-mortality model; biocontrol

小菜蛾 *Plutella xylostella*（L.）是十字花科蔬菜上的一种重要害虫，在南亚、东南亚及中国南部地区发生尤为严重，每年给全世界农业带来的经济损失达10亿美元（Talekar and Shelton，1993）。广谱性杀虫剂的大量长期使用不仅杀伤了天敌，而且使小菜蛾对几乎所有在田间使用的化学杀虫剂都产生了严重的抗性（Shelton and Wyman，1992），小菜蛾还是对Bt制剂产生抗性的第1种害虫（Tabashnik，1994），近年来还对阿维菌素类小菜蛾特效生物制剂产生了不同程度的抗性（冯夏等，2001）。抗性的产生，化学防治的失败以及对安全和环境等的影响，使得寻找有效的生物防治措施成为当今和未来小菜蛾综合治理的发展方向（Talekar，1996）。

作为小菜蛾综合治理的一个重要的组成部分，昆虫病原真菌的研究和利用已有数年历史，其中一些菌株在生产上显示出了良好的应用潜力（Cherry *et al*.，2002）。能够感染小菜蛾的病原真菌包括根虫瘟霉 *Zoophthora radicans*（Pell and Wilding，1993）、绿僵菌 *Metarhizium anisopliae*（Ma，2000）、球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*（Vandenberg *et al*.，1998a）、玫烟色拟青霉 *Paecilomyces fumosoroseus*（Altre *et al*.，1999）、镰刀菌 *Fusarium* sp.（Vandenberg and Ramos，1997）等。其中，球孢白僵菌在实验室、温室和田间应用都显示了对小菜蛾较高的致病力（Vandenberg and Ramos，1997；Shelton *et al*.，1998；Vandenberg *et al*.，1998b）；而喷施玫烟色拟青霉孢子能显著降低田间甘蓝上小菜蛾的种群密度（Ibrahim and Low，1993）。

玫烟色拟青霉地理分布广泛，寄主范围广，特别是对蚜虫、粉虱等具刺吸式口器的昆虫有很好的防治效果（陈巍巍和冯明光，1999）。上世纪90年代以来国外有关其生物学、遗传变异、代谢产物和应用方面的研究报道较多（Smits *et al*.，1996；Lacey *et al*.，1999；Cantone and Vandenberg，1999）。美国南方近年由于粉虱暴发成灾，玫烟色拟青霉作为其主要病原微生物而倍受关注（Wraight *et al*.，2000）。荷兰已开发出玫烟色拟青霉的制剂，专用于包括粉虱在内的刺吸式口器害虫的防治（Faria and Wraight，2001）。在国内，研究工作主要集中在玫烟色拟青霉菌株的分离鉴定、代谢产物活性研究、致病性测定等方面，研究的防治对象主要为烟粉虱、蚜虫和菜青虫（黄勃等，2000；柴一秋等，2000；黄振和任顺祥，2004；张仙红和嵇能焕，2006）。在利用玫烟色拟青霉防治小菜蛾方面，Altre 等（1999，2001a）比较了8株玫烟色拟青霉对小菜蛾的致病力，探讨了致病力与孢子大小、萌发速度以及孢子对害虫表皮附着能力的关系，并研究了影响菌株对小菜蛾致病力的因子。Gopalakrishnan 等（2000）研究了小菜蛾对玫烟色拟青霉的敏感性。而我国有关利用玫烟色拟青霉防治小菜蛾方面的研究未见报道。

在室内筛选对小菜蛾具高致病力菌株的过程中，发现一株原始分离自家白蚁 *Coptotermes formosanus* 的玫烟色拟青霉 SCAU-PFCF01 对小菜蛾2龄幼虫具有较强的致病力和较快的致死速度（另文发表）。本实验利用该株玫烟色拟青霉对小菜蛾各龄幼虫进行生物测定，并用时间-剂量-死亡率模型（TDM模型）对其时间效应和剂量效应进行分析，以期明确该菌株对小菜蛾侵染的最佳龄期和浓度，进一步评价玫烟色拟青霉防治小菜蛾的潜力，为玫烟色拟青霉的田间应用提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 供试虫源与寄主植物

2004年10月于华南农业大学试验农场的十字

花科蔬菜地采集小菜蛾老熟幼虫，在实验室内用菜心苗饲养至化蛹，待其羽化产卵后建立的小菜蛾实验室品系作为供试虫源。供试植物品种为广东省农科院蔬菜所生产的美青油菜一号菜心 *Brassica parachinensis*。

小菜蛾的饲养：室内采用蛭石菜心苗法饲养小菜蛾。在搪瓷盘中铺一层约 3 cm 的高温灭菌蛭石，用 60～70℃热水打破菜心种子的休眠，浸泡 5 h 后，将菜心种子均匀撒于蛭石表面，用培养皿盖轻轻拍实，将苗盘放在（25 ± 1）℃下，待种子萌发后放于室外自然光照条件下培养，待菜心苗长到 4 cm 左右时，将菜苗放入有小菜蛾蛹和新羽化成虫的产卵笼（100 cm × 50 cm × 40 cm）内。养虫笼顶放有 10% 蜂蜜糖水棉球，供成虫补充营养。根据成虫产卵情况更换菜心苗，一般 12 或 24 h 更换一次。将更换的带虫卵的菜心苗移至室内养虫架饲养，当菜心苗快被幼虫吃光时，将幼虫转接到新鲜菜心苗上。老熟幼虫化蛹后，收集蛹作为继代繁殖的虫源。饲养条件为（25 ± 1）℃，相对湿度 65% ～ 75%，光周期 14L∶10D。

1.2　供试菌株和孢子悬浮液的配制

玫烟色拟青霉最初分离自家白蚁，菌株编号为 SCAU-PFCF01，在华南农业大学昆虫生态室以 PDA 斜面保存于 4℃的冰箱中。

实验时以接菌后的 PDA 平板在 25℃恒温光照（12L∶12D）培养箱中培养 7 天，待菌丝长满培养皿后加入 20 mL 0.03%吐温-80 无菌水，用接种针轻刮真菌的菌丝及孢子，将菌液倒入烧杯中，用磁力搅拌器搅拌 30 min。待孢子完全分散后，用双层医用纱布过滤菌液，获得孢子悬浮液，弃去杂质和培养基残物。用血球计数器计数母液的孢子浓度，用 0.03% 吐温-80 的无菌水配成 5 个供试浓度：1×10^3、1×10^4、1×10^5、1×10^6 和 1×10^7 个孢子/mL。

1.3　生物测定方法

采用浸液法。选取龄期比较整齐的 2、3、4 龄初幼虫，分别浸于以上 5 个供试浓度的孢子悬浮液中，处理 10 s 后取出，放在干净的滤纸上将多余水分吸干。然后将处理后的每 10 头幼虫放入一直径 9 cm 的消毒培养皿内。培养皿底放有一张吸少量蒸馏水的滤纸保湿，在培养皿内放 1 片干净的菜心叶片供食，用保鲜纸将培养皿封好，在薄膜上扎孔通气，置于 25℃恒温、光照 12L∶12D 和相对湿度 80%以上的培养箱中培养。每日检查并记录小菜蛾的死亡数，并将死亡的幼虫挑到皿底放有湿滤纸的培养皿中保湿培养，根据虫体是否长出菌丝确定其死因。每天更换新鲜菜心叶片。每处理 20 头幼虫，重复 5 次，共 100 头幼虫。以 0.03% 的吐温-80 的无菌水处理的 100 头幼虫作为对照。

1.4　模型模拟分析

时间-剂量-死亡率模型（time-dose-mortality model，TDM）同时考虑了时间效应和剂量效应，能够体现出生物测定数据的完整性和客观性（Nowierski *et al*.，1996；冯明光，1998），使生物测定数据的分析有了更坚实的生物学基础，不仅可以估计传统方法所产生的信息（如 LT_{50}），还可产生传统方法无法产生的信息，即剂量效应随时间变化和时间效应随剂量变化的趋势信息。

TDM 模型的表述如下：

$$p_{ij} = 1 - \exp[-\exp(\tau_j + \beta\log10(d_i))] \qquad (1)$$

式中 p_{ij} 表示在时间 t_j（$j = 1, 2, \cdots, j$）即接种后第 j 日由剂量 d_i（$i = 1, 2, \cdots, i$）引起的试虫累计死亡概率，待估参数 β 是与剂量效应有关的斜率，τ_j 为对应于 t_j（从实验开始至第 j 次观察的时间总长）的时间效应参数。由于累计死亡概率是时间连续的变量，不满足模型模拟的独立性假设。因此，考虑剂量 d_i 使试虫在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内可能发生的条件死亡概率：

$$q_{ij} = 1 - \exp[-\exp(\gamma_j + \beta\log10(d_i))] \qquad (2)$$

式 2 中 β 与式 1 同义，γ_j 为描述区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内的时间效应参数。条件死亡概率的计算依赖于完全相互独立的时间区间，它是区间结束时的实际死亡数与区间起始时的存活数之比。由于满足时间变量的独立性假设，式 2 可以进行模型拟合，获得参数 γ_j 后可以估计参数 τ_j 并由此估计出式 1 的所有参数。式 2 的拟合通过二项式变量［在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内死亡比例（q_{ij}）和存活比例（$1 - q_{ij}$）］的最大似然函数逼近而达成。

整个模拟及运算过程在 DPS 数据处理系统计算机软件上完成。

2　结果与分析

2.1　不同浓度玫烟色拟青霉处理后小菜蛾幼虫的逐日死亡情况

不同浓度玫烟色拟青霉处理后小菜蛾各龄幼虫逐日累计死亡率见图 1。在接种后的第 2 天，所有处理的幼虫均开始发病死亡，且 2 龄和 3 龄幼虫在接种后第 2 天、4 龄幼虫在接种后第 3 天就达到了

死亡高峰。随接种浓度的增加，各处理幼虫的死亡率也随之增加，在最高浓度 1×10^7，小菜蛾 2、3 和 4 龄幼虫的最高死亡率分别为 96%、85%、80%。感病死亡的幼虫表现典型的虫生真菌致死症状，虫尸保湿培养后第 2 天开始从体表长出菌丝，随后产生大量的孢子。尽管对照也有少量（通常低于 10%）的幼虫死亡，但无一表现出真菌致死症状。

2.2　玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫的 TDM 模型模拟

由于 2、3 和 4 龄幼虫分别在接种 7、5 和 4 天后累计死亡率不再增长，因此分别取 2 龄幼虫前 7 天、3 龄幼虫前 5 天及 4 龄幼虫前 4 天的累计死亡率数据，经与对照的自然死亡率进行校正后，进行时间-剂量-死亡率模型模拟分析和参数估计。TDM 模拟的结果见表 1。各处理剂量与时间效应参数的 t 测验值均达到极显著水平（$P < 0.0001$），即标准误差相对于参数估计值极小，说明供试菌株的剂量效应与时间效应极显著。2、3 和 4 龄幼虫剂量效应的斜率 β 分别为 0.5386、0.3547 和 0.3540，说明 2 龄幼虫对浓度的增加最为敏感，其次为 3 龄幼虫。时间效应参数在 2 龄和 3 龄幼虫接种后第 2 天（γ_2）、4 龄幼虫接种后第 3 天（γ_3）达到最大，与实验观察中的死亡高峰期相吻合。

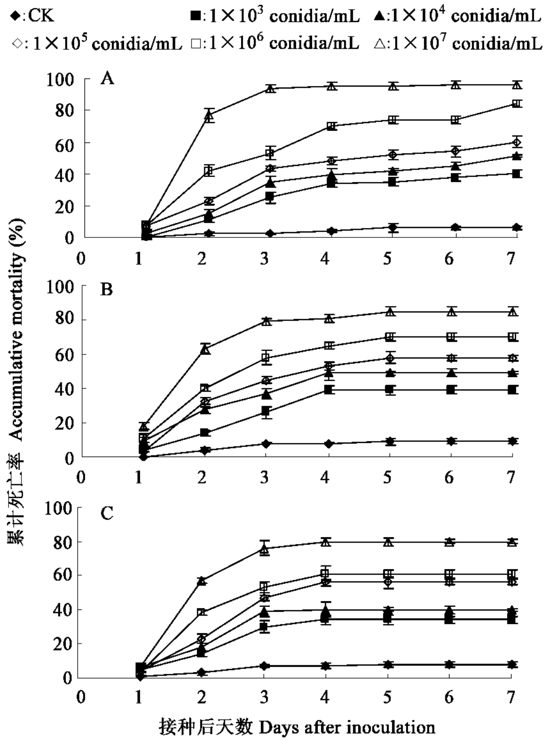

图 1　接种玫烟色拟青霉后小菜蛾幼虫逐日累计死亡率

Fig. 1　The daily accumulative mortality of the diamondback moth larvae after treatment with *Paecilomyces fumosoroseus*

A：2 龄 2nd instar；B：3 龄 3rd instar；C：4 龄 4th instar.

表 1　玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫的 TDM 模型模拟与参数估计

Table 1　Parameters estimated by fitting the time-dose-mortality (TDM) model to assay data of *Paecilomyces fumosoroseus* against the diamondback moth larvae of different instars

条件死亡概率模型（式 2） Conditional mortality model				累计死亡概率模型（式 1） Cumulative mortality model			
参数 * Parameter *	估计值 Value	标准误 *SE*	t 检验 t test	参数 * Parameter *	估计值 Value	Var(τ)	cov(β, τ)
2 龄 2nd instar							
β	0.5386	0.0457	11.8000	β	0.5386	0.0027	0.0027
γ_1	-5.9711	0.3376	17.6891	τ_1	-5.9711	0.1472	-0.0158
γ_2	-3.8346	0.2758	13.9005	τ_2	-3.7230	0.0974	-0.0155
γ_3	-3.8700	0.2594	14.9171	τ_3	-3.1005	0.0862	-0.0147
γ_4	-4.3900	0.2844	15.4365	τ_4	-2.8571	0.0828	-0.0145
γ_5	-5.3415	0.3683	14.5043	τ_5	-2.7770	0.0818	-0.0144
γ_6	-5.5666	0.4050	13.7460	τ_6	-2.7174	0.0806	-0.0143
γ_7	-4.4659	0.3049	14.6479	τ_7	-2.5570	0.0788	-0.0141
3 龄 3rd instar							
β	0.3547	0.0439	8.0817	β	0.3547	0.0020	0.0002
γ_1	-4.2447	0.2898	14.6446	τ_1	-4.2447	0.0869	-0.0113
γ_2	-2.8917	0.2568	11.2613	τ_2	-2.6618	0.0669	-0.0110
γ_3	-3.1793	0.2596	12.2474	τ_3	-1.9381	0.0629	-0.0107
γ_4	-3.4253	0.2646	12.9461	τ_4	-1.9381	0.05978	-0.0105
γ_5	-4.3866	0.3667	11.9624	τ_5	-1.8552	0.0600	-0.0105
4 龄 4th instar							
β	0.3540	0.0464	7.6692	β	0.3540	0.0022	0.0022
γ_1	-4.9039	0.3251	15.0839	τ_1	-4.9039	0.1107	-0.0122
γ_2	-3.0154	0.2743	10.9921	τ_2	-2.8745	0.0077	-0.0125
γ_3	-2.9041	0.2607	11.1580	τ_3	-2.1960	0.0693	-0.0120
γ_4	-3.9450	0.3118	12.6880	τ_4	-2.0364	0.0683	-0.0120

*：参数符号下标表示接种后相应时间区间（天）。The subscripts represent the number of days or the ith day after treatment.

所建模型均通过 Hosmer-Lemeshow 拟合异质性检验(2 龄幼虫：$C = 4.69$，$df = 7$，$\chi^2_{0.05} = 14.07$；3 龄幼虫：$C = 9.10$，$df = 8$，$\chi^2_{0.05} = 15.51$；4 龄幼虫：$C = 13.07$，$df = 7$，$\chi^2_{0.05} = 14.07$；$C < \chi^2_{0.05}$)，表明所建各处理模型均不存在异质性，即它们能够无偏描述不同浓度处理下玫烟色拟青霉与小菜蛾各龄幼虫间的互作关系。

2.3　玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫致死的剂量效应

图 2 是根据 TDM 模型估计的玫烟色拟青霉接种小菜蛾幼虫后不同时间的剂量效应值及其标准误。可以看出，随接种天数的增加，侵染所需的孢子悬浮液浓度降低，相应的 LC_{50} 和 LC_{90} 也随之降低。2 龄幼虫接种后第 7 天、3 龄幼虫接种后第 5 天、4 龄幼虫接种后第 4 天的 LC_{50} 估计值分别为 1.17×10^4、1.44×10^4 和 5.21×10^4/mL，LC_{90} 估计值分别为 1.98×10^6、3.82×10^7 和 1.29×10^8/mL，由于 3 龄和 4 龄幼虫实际最高累计死亡率未达到 90%，因此模型估计的 LC_{90} 较大。

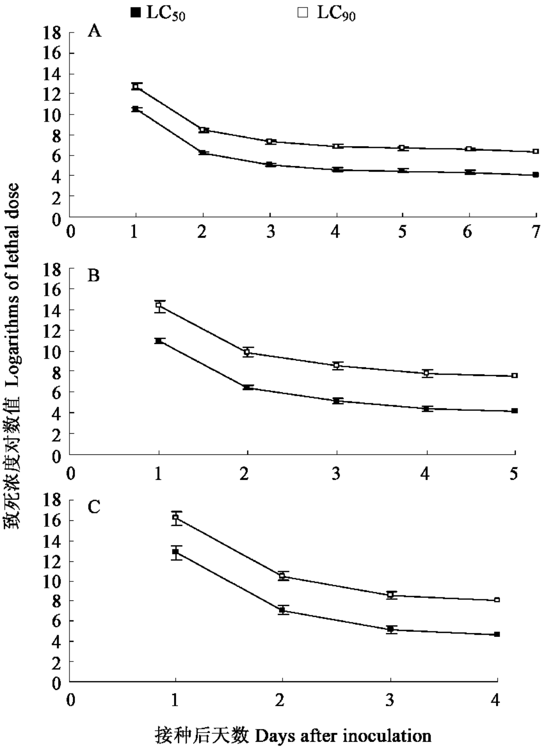

图 2　玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫的致死剂量对数值

Fig. 2　Logarithms of the time-dependent LC_{50} and LC_{90} values for *Paecilomyces fumosoroseus* against the diamondback moth larvae

A：2 龄 2nd instar；B：3 龄 3rd instar；C：4 龄 4th instar.

2.4　玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫致死的时间效应

玫烟色拟青霉对小菜蛾各龄幼虫的致死中时见表 2。随着真菌孢子悬浮液浓度的增加，供试各龄幼虫的 LT_{50} 值递减，在低于 1×10^4/mL 的浓度处理中，各龄幼虫的最终死亡率均低于 50%，因此计算不出 LT_{50} 值；在 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$/mL 的范围内，2 龄幼虫的 LT_{50} 值从 3.16 天降低到 1.72 天，3 龄幼虫的 LT_{50} 从 3.21 天降低到 1.83 天，4 龄幼虫的 LT_{50} 从 3.69 天降低到 2.04 天。LT_{90} 只有 2 龄幼虫在高浓度(1×10^7/mL)时才能达到，为 3.71 天。由此可见 2 龄幼虫致死所需的时间最短，其次为 3 龄幼虫，4 龄幼虫致死所需的时间最长。

表 2　玫烟色拟青霉对小菜蛾各龄幼虫的 LT_{50} 和 LT_{90}

Table 2　The values of LT_{50} and LT_{90} for *Paecilomyces fumosoroseus* against the diamondback moth larvae of different instars

幼虫龄期 Larval instar	LT_{50}/LT_{90}	不同处理浓度(孢子/mL)下的致死时间(d) Lethal time (days) at different concentration (conidia/mL)		
		10^5	10^6	10^7
2 龄	LT_{50}	3.16	2.19	1.72
2nd instar	LT_{90}	–	–	3.71
3 龄	LT_{50}	3.21	2.34	1.83
3rd instar	LT_{90}	–	–	–
4 龄	LT_{50}	3.69	2.54	2.04
4th instar	LT_{90}	–	–	–

3　讨论

本实验结果表明，玫烟色拟青霉菌株 SCAU-PFCF01 对小菜蛾幼虫有很强的致病力，这从其对小菜蛾的致死中浓度和致死中时两方面均可表现出来。由 TDM 模型估计的剂量和时间效应参数，接种玫烟色拟青霉后小菜蛾 2、3 和 4 龄幼虫的 LC_{50} 分别为 1.17×10^4、1.44×10^4 和 5.21×10^4/mL，在处理浓度为 1×10^7/mL 时，2、3 和 4 龄幼虫的 LT_{50} 分别为 1.72 天、1.83 天和 2.04 天。在已报道的对小菜蛾毒力最强的病原真菌中，粉拟青霉 *P. farinosus* 对小菜蛾 2 龄幼虫的 LC_{50} 为 1.11×10^5/mL，浓度 1.7×10^{10}/mL 时 2 龄幼虫的 LT_{50} 为 2.31 天 (Gopalakrishnan *et al*., 2002)；球孢白僵菌 CS-1 在实验室和温室条件下，处理浓度为 1×10^8/mL 时，对小菜蛾 2 龄幼虫的 LT_{50} 分别为 1.63 天和 3.61 天(Yoon *et al*., 1999)；绿僵菌对小菜蛾 2 龄幼虫的 LC_{50} 为 2.03×10^4/mL，处理浓度为 1×10^8/mL 时 2 龄幼虫的 LT_{50} 为 4.97 天(Ma, 2000)。因此本实验所用的玫烟色拟青霉菌株，是目前为止所报道的对小菜蛾幼虫具最低的致死浓度和最快的致死速度的昆虫病原真菌，表现出该菌株在小菜蛾生物防治中具较强的应用潜力。

Altre 等(1999，2001b)报道，玫烟色拟青霉对小菜蛾的致病力与菌株的孢子大小、萌发速度、对小菜蛾幼虫体壁的附着能力、对体壁的穿透能力以及在血腔中的增殖速度呈正相关关系。本实验中的玫烟色拟青霉菌株最初分离自家白蚁，却对小菜蛾如此强的致病力和致死速度，其致病机理究竟是否与以上报道的几方面有关，有待进一步深入研究。在实验中还发现，小菜蛾幼虫在接种玫烟色拟青霉后的第2天就开始死亡，此时死亡的虫体身体较软，虫体内并未充满菌丝，用解剖针挑破体壁后有大量体液流出，这与其他病原真菌如白僵菌致病死亡时虫体充满菌丝、虫体由于菌丝的大量增殖呈现僵硬的现象不同。Lacey 等(1999)认为玫烟色拟青霉所分泌的代谢产物青霉素是其能迅速杀死寄主烟粉虱的主要原因。因此，本株玫烟色拟青霉对小菜蛾幼虫如此快的致死速度是否由于毒素引起，值得进一步研究。

本实验结果表明，不同龄期的小菜蛾幼虫对玫烟色拟青霉菌株 SCAU-PFCF01 的敏感性存在差异，其敏感高低顺序为2龄、3龄和4龄，这可能与小菜蛾不同龄期的体壁结构差异有关。研究表明虫生真菌主要通过接触从体壁侵入，低龄幼虫的体壁较薄，真菌孢子更易穿透侵染，而高龄幼虫和成虫体壁蜡质层增厚，表皮硬化加强，血细胞数量增多，防卫机制发育健全而增强了抗病性，真菌孢子难以穿透侵染(蒲蛰龙和李增智，1996)。然而，据 Vandenberg 等(1998a)报道，小菜蛾3龄和4龄幼虫比2龄幼虫对球孢白僵菌的感染更敏感，因为2龄幼虫历期较短，粘附于身体表面的孢子能很快随脱皮脱落。本实验中2龄幼虫对玫烟色拟青霉的敏感性高于3龄和4龄幼虫，可能与该株玫烟色拟青霉孢子快速的入侵能力有关，从实验结果可知该株玫烟色拟青霉在浓度 1×10^7 个孢子/mL 对2龄小菜蛾的 LT_{50} 仅为1.72天，由此推测孢子入侵所需的时间更短。由于本实验所选用的为龄期比较整齐的各龄初幼虫，各龄幼虫的历期均在2天以上，即玫烟色拟青霉在幼虫蜕皮之前就已成功侵入虫体内，因此幼虫的脱皮尚未能对其敏感性造成影响。

参 考 文 献 (References)

Altre JA，Vandenberg JD，2001a. Penetration of cuticle and proliferation in hemolymph by *Paecilomyces fumosoroseus* isolates that differ in virulence against lepidopteran larvae. *Journal of Invertebrate Pathology*，78：81 –86.

Altre JA，Vandenberg JD，2001b. Factors influencing the infectivity of isolates of *Paecilomyces fumosoroseus* against diamondback moth，*Plutella xylostella*. *Journal of Invertebrate Pathology*，78：31 – 36.

Altre JA，Vandenberg JD，Cantone FA，1999. Pathogenicity of *Paecilomyces fumosoroseus* isolates to diamondback moth，*Plutella xylostella*：correlation with spore size，germination speed，and attachment to cuticle. *Journal of Invertebrate Pathology*，73(3)：332 – 338.

Cantone FA，Vandenberg JD，1999. Genetic transformation and mutagenesis of the entomopathogenic fungus *Paecilomyces fumosoroseus*. *Journal of Invertebrate Pathology*，74(3)：281 – 288.

Chai YQ，Zhang LR，Zhang H，Chen ZA，Chen LF，2000. Preliminary study on biological activities of metabolites from entomogenous fungi. *Journal of Nanjing Agricultural University*，23(3)：37 – 40. [柴一秋，张乐人，张晖，陈祝安，陈利锋，2000. 几种虫生真菌代谢产物生物活性的初步研究. 南京农业大学学报，23(3)：37 – 40]

Chen WW，Feng MG，1999. Current status in basic and applied research on the entomopathogenic fungus，*Paecilomyces fumosoroseus*. *Natural Enemies of Insect*，21(3)：140 – 144. [陈巍巍，冯明光，1999. 玫烟色拟青霉的研究与应用现状. 昆虫天敌，21(3)：140 – 144]

Cherry AJ，Mercadier G，Meikle W，Castelo-Branco M，Schroer S，2002. The role of entomopathogens in DBM biological control. In：Kirk AA，Bordat D eds. Improving Biocontrol of *Plutella xylostella*：Proceedings of the International Symposium. CIRAD，Montpellier，France. 51 – 70.

Faria M，Wraight SP，2001. Biological control of *Bemisia tabaci* with fungi. *Crop Protection*，20：767 – 778.

Feng MG，1998. Substituting time-dose-mortality model for probit analysis technique. *Entomological Knowledge*，35：233 – 237. [冯明光，1998. 时间-剂量-死亡率模型取代机率分析技术. 昆虫知识，35：233 – 237]

Feng X，Chen HY，Lu LH，Mo Y，Lu YC，Xie QH，Zhang XX，2001. A study on the resistance of diamondback moth to abamectin in Guangdong Province. *Journal of South China Agricultural University*，22(2)：35 – 38. [冯夏，陈焕瑜，吕利华，莫严，卢悦昌，谢齐贺，张小雄，2001. 广东小菜蛾对阿维菌素的抗性研究. 华南农业大学学报，22(2)：35 – 38]

Gopalakrishnan C，Anusuya D，Narayanann K，2000. Susceptibility of *Plutella xylostella* to the entomopathogenic fungus *Paecilomyces farinosus*. *Indian Journal of Agricultural Science*，70(5)：341 – 343.

Gopalakrishnan C，Narayanan K，Anusuya D，2002. Determination of LD_{50} and LT_{50} of *Paecilomyces farinosus* (Holmskiold) Brown and Smith on larval instars of *Plutella xylostella* L. *Entomon*，27(3)：249 – 254.

Huang B，Yu CX，Chen XL，Fan MZ，Li ZZ，2000. Classification and identification of species and strains in *Paecilomyces* by using RAPD. *Mycosystema*，21(1)：33 – 38. [黄勃，于春秀，陈晓琳，樊美珍，李增智，2000. 利用 RAPD 技术对拟青霉属菌株进行分类鉴定. 菌物系统，21(1)：33 – 38]

Huang Z，Ren SX，2004. Biology of *Paecilomyces fumosaroseus* isolates and their pathogenicity against *Bemisia tabaci*. *Chinese Journal of Biological Control*，20(4)：248 – 251. [黄振，任顺祥，2004. 玫烟色拟青霉分离株的生物学特性及其对烟粉虱的致病力. 中国生物防治，20(4)：248 – 251]

Ibrahim YB，Low W，1993. Potential of mass-production and field efficacy of isolates of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Paecilomyces fumosoroseus* against *Plutella xylostella*. *International Journal of Pest Management*，39：288 – 292.

Lacey A，Kirk A，Millar L，Mercadier G，Vidal C，1999. Ovicidal and larvicidal of conidia and blastospores of *Paecilomyces fumosoroseus* (Deuteromycotina： Hyphomicetes) against *Bemisia argentifolii* (Homoptera：Aleyrodidae) with a description of a bioassay system allowing prolonged survival of control insects. *Biocontrol Science and Technology*，9：9 – 18.

Ma J，2000. Laboratory susceptibility of *Plutella xylostella* to *Metarhizium anisopliae* and *Nomuraea rileyi*. *Entomologia Sinica*，7(1)：53 – 57.

Nowierski RM，Zeng Z，Jaronski S，Delgado F，Swearingen W，1996. Analysis and modeling of time-dose-mortality of *Melanoplus sanguinipes*，*Locusta migratoria migratorioides*，and *Schistocerca gregaria* (Orthoptera： Acrididae) from *Beauveria*，*Metarhizium*，and *Paecilomyces* isolates from Madagascar. *Journal of Invertebrate Pathology*，67：236 – 252.

Pell JK，Wilding N，1993. Selection of an *Zoophthora radicans* Brefeld (Zygomycetes：Entomophthorales) for biocontrol of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera：Yponomeutidae). *Journal of Invertebrate Pathology*，61：75 – 80.

Pu ZL，Li ZZ，1996. Insect Mycology. Hefei：Anhui Science and Technology Press. 95 – 99. [**蒲蛰龙，李增智**，1996. **昆虫真菌学. 合肥：安徽科学技术出版社**. 95 – 99]

Shelton AM，Vandenberg JD，Ramos M，Wilsey WT，1998. Efficacy and persistence of *Beauveria bassiana* and other fungi for control of diamondback moth on cabbage seedlings. *Journal of Entomological Science*，33：142 – 151.

Shelton AM，Wyman JA，1992. Insecticide resistance of diamondback moth in North America. In：Talekar NS ed. Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests：Proceedings of the Second International Workshop. Taiwan：Asian Vegetable Research and Development Center. 447 – 454.

Smits N，Fargues J，Rougier M，Gouje R，Itier B，1996. Effects of temperature and solar radiation interactions on the survival of quiescent conidia of the entomopathogenic hyphomycete *Paecilomyces fumosoroseus* (Wize) Brown and Smith. *Mycopathologia*，135 (3)：163 – 170.

Tabashnik BE，1994. Evolution of resistance to *Bacillus thuringiensis*. *Annual Review of Entomology*，39：47 – 79.

Talekar NS，1996. Biological control of diamondback moth in Taiwan – a review. *Plant Protection Bulletin*，38：167 – 189.

Talekar NS，Shelton AM，1993. Biology，ecology，and management of the diamondback moth. *Annual Review of Entomology*，38：275 – 301.

Vandenberg JD，Ramos M，Altre JA，1998a. Dose-response and age- and temperature-related susceptibility of the diamondback moth (Lepidoptera：Yponomeutidae) to two isolates of *Beauveria bassiana* (Hyphomycetes：Moniliaceae). *Environmental Entomology*，27：1 017 – 1 021.

Vandenberg JD，Ramos MR，1997. Screening of fungal isolates against diamondback moth larvae. *Arthropod Managment Tests*，22：420 – 421.

Vandenberg JD，Shelton AM，Ramos M，Wilsey WT，1998b. Assessment of *Beauveria bassiana* for control diamondback moth on crucifers. *Journal of Economic Entomology*，91：624 – 630.

Wraight SP，Carruthers RI，Jaronski ST，Bradley CA，Garza CJ，Galaini-Wraight S，2000. Evaluation of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Paecilomyces fumosoroseus* for microbial control of the silverleaf whitefly，*Bemisia argentifolii*. *Biological Control*，17：203 – 217.

Yoon CS，Sung GH，Park HS，Lee SG，Lee JO，1999. Potential of the entomopathogenic fungus，*Beauveria bassiana* strain CS-1 as a biological control agent of *Plutella xylostella* (Lep.，Yponomeutidae). *Journal of Applied Entomology*，123：423 – 425.

Zhang XH，Ji NH，2006. Bioassay for the virulence of *Paecilomyces fumosoroseus*. *Journal of Shanxi Agricultural University*，26(1)：24 – 26. [**张仙红，嵇能焕**，2006. **玫烟色拟青霉菌株的毒力测定. 山西农业大学学报**，26(1)：24 – 26]

(责任编辑：黄玲巧)